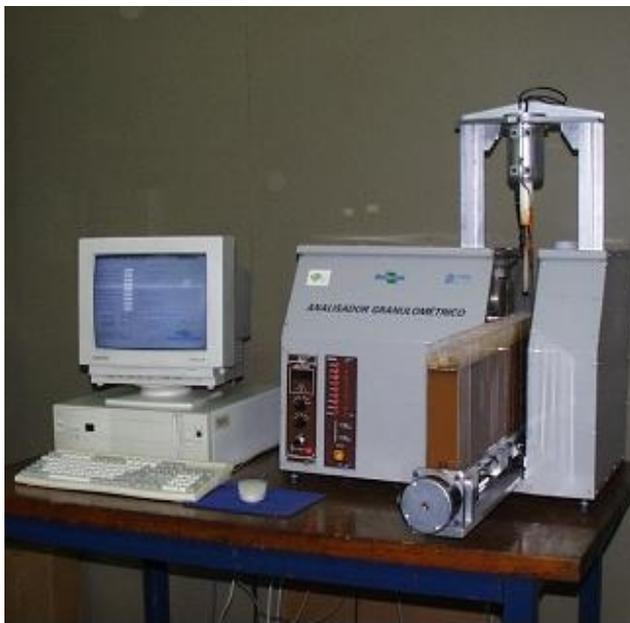


Foto: Arquivo



## Retenção de Água no Solo Estimada Através da Medida de Distribuição do Tamanho das Partículas do Solo

Carlos Manoel Pedro Vaz<sup>1</sup>  
Murilo de Freitas Iossi<sup>2</sup>  
João de Mendonça Naime<sup>3</sup>  
Alvaro Macedo da Silva<sup>4</sup>

A capacidade de um solo em armazenar água para o crescimento e desenvolvimento das plantas está diretamente relacionado a vários atributos físicos dos solos, dentre eles a curva de retenção de água ou curva característica potencial-umidade (Tormena et al. 1998). Para a determinação da curva de retenção da água no solo, pode-se empregar vários métodos como o funil de placa porosa, mesa de tensão ou câmaras de pressão (panela de Richards), em amostras de solo indeformado ou deformado (Embrapa, 1997). Em campo, uma combinação de métodos são utilizados, mas na maioria das vezes o potencial da água ( $\psi$ ) é determinado por um tensiômetro conectado a um manômetro de mercúrio ou a um transdutor de pressão, enquanto que técnicas como a moderação de neutrons, reflectometria no domínio do tempo (TDR) e gravimetria são utilizadas para a determinação da umidade volumétrica ( $\theta$ ).

Devido às dificuldades experimentais e ao longo tempo envolvido nessas determinações têm-se observado um crescente interesse por métodos indiretos de estimativa da capacidade de retenção da água nos solos (Arya et al. 1999; Pachepsky e Rawls, 1999), os quais utilizam dados taxonômicos simples. Dentre eles, os mais importantes são os métodos da Função de Pedotransferência (PTF), o qual descreve equações que expressam dependências da

retenção da água e condutividade hidráulica com parâmetros básicos disponíveis em levantamentos de solos e o modelo de Arya e Paris (1981), o qual usa a similaridade entre as curvas de distribuição do tamanho de partículas e as curvas de retenção de água no solo.

Tomazella et al. (2000), desenvolveu um modelo de PTF para as condições de solos brasileiros, utilizando dados de mais de 500 horizontes. O desenvolvimento das equações de PTF adaptadas para as condições de solos tropicais, possibilitou a determinação dos parâmetros da curva de retenção de Van Genuchten (1980) com uma precisão muito melhor do que com o uso de equações de PTF desenvolvidas para outros solos. Já o modelo de Arya e Paris ainda carece de validação para as condições de solos brasileiros. Essa ausência de trabalhos deve-se, provavelmente, à dificuldade da obtenção das curvas completas de distribuição do tamanho das partículas dos solos, que é uma análise muito mais difícil e trabalhosa que a simples textura, utilizada nas equações de PTF.

Neste trabalho, utilizamos o analisador granulométrico de solos desenvolvido na Embrapa Instrumentação Agropecuária (Vaz et al. 1999 e Naime et al. 2001) para a obtenção da distribuição dos tamanhos de partículas das principais classes de solos do Estado de São Paulo e a

<sup>1</sup> Pesquisador, Físico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, C.P. 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, vaz@cnpdia.embrapa.br

<sup>2</sup> Aluno de Agronomia, ESALQ/USP, Cx. P. 9, 13418-970, Piracicaba-SP

<sup>3</sup> Pesquisador, Eng. Eletrônico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, C.P. 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, naime@cnpdia.embrapa.br

<sup>4</sup> Pesquisador, Eng. Eletrotécnico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, C.P. 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, alvaro@cnpdia.embrapa.br

validação do modelo de Arya e Paris para esses solos.

Modelo de Arya e Paris

O modelo de Arya e Paris utiliza 2 conceitos básicos da física do solo. Primeiro a equação da capilaridade, que relaciona o potencial da água, expresso pela ascensão capilar (h), com o diâmetro do poro:

$$h = \frac{2 \cos \theta}{w g r_i} \quad (1)$$

onde (N m<sup>-1</sup>) é a tensão superficial da água na interface água-ar,  $\theta$  o ângulo de contato, w (kg m<sup>-3</sup>) a densidade da água, g (m s<sup>-2</sup>) a aceleração da gravidade e r<sub>i</sub> (m) o raio do poro. No sistema internacional SI, obtêm-se os seguintes valores dos parâmetros da equação (1):

$\sigma = 0,0728 \text{ N m}^{-1}$ ,  $g = 9,81 \text{ m s}^{-1}$  e pode-se considerar ainda que  $\theta = 0$  ( $\cos \theta = 1$ ) ou seja, com um completo molhamento das partículas.

Segundo, a distribuição do tamanho das partículas do solo e a contribuição de cada fração para a saturação da água do solo:

$$1 = \sum_{i=0}^i \frac{w_i}{\rho_i} \quad (2)$$

onde i são as diversas frações das partículas do solo,  $\rho_i$  (kg m<sup>-3</sup>) a densidade das partículas do solo,  $\rho_s$  (kg m<sup>-3</sup>) a densidade global do solo e w (g g<sup>-1</sup>) a fração de massa do solo, dada pela curva de distribuição do tamanho de partículas.

A conexão entre a equação (1) e (2) para a estimativa da curva de retenção pelo modelo de Arya e Paris é feita associando-se o raio do poro (r<sub>i</sub>) com o raio da partícula (R<sub>i</sub>) através da seguinte equação (Arya e Paris, 1981)

$$r_i = R_i \sqrt{4en_i / 6} \quad (3)$$

onde n<sub>i</sub> é o número de partículas esféricas da i-ésima classe de massa do solo e e é a relação de vazios, dados por:

$$n_i = \frac{3w_i}{4 R_i^3} \quad (4)$$

$$e = \frac{p}{s} \quad (5)$$

O parâmetro da equação (3) é obtido através de um ajuste com dados reais de curvas retenção para um grande número de amostras de solo. Arya e Paris (1981) em sua formulação original obteve  $e = 1,38$  e em sua modificação apresentada em Arya e Dierolf (1992) obteve  $e = 0,938$ . Além disso, Basile e D'Urso (1997) sugeriram uma variação de e em função da tensão da água, utilizando uma combinação das equações (1), (3), (4) e (5).

No nosso trabalho utilizamos o valor de  $e = 0,938$  por Arya e Dierolf (1992), bem como o procedimento alternativo, onde e é apresentado como sendo uma função de h ou  $e(h)$  (Basile e D'Urso, 1997). Neste caso, utilizaremos a combinação das (1), (3), (4) e (5), como sugerido por Basile e D'Urso (1997) e a forma da equação de Van Genuchten invertida (h versus  $\theta$ ):

$$\theta = \frac{1}{1 + \left( \frac{2.5}{2e} \frac{hgR_i}{ag} \right)^2} \quad (6)$$

$$h = \frac{r}{r_i} \left( \frac{\theta}{1-\theta} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (7)$$

Propriedades dos solos utilizados na validação

Algumas propriedades dos solos utilizados na validação do modelo são apresentadas na Tabela 1, onde observa-se uma grande variação na textura, com solos desde bastante arenosos (RQo) até bastante argilosos (NVef).

Tabela 1. Propriedades físicas dos solos utilizados neste estudo.

Solo	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%) total	Argila (%) agua	pH CaCl2	M.O. g dm <sup>-3</sup>
RQo	86	6	8	6	4,6	11
LVdf	43	8	49	18	4,7	54
LVAd	62	6	32	14	4,3	31
LVd	43	10	47	22	5,5	37
PVAd	70	6	24	18	4,9	23
PVAbt	43	6	51	33	4,7	11
NVef	18	16	66	49	4,6	39

Curvas de distribuição do tamanho das partículas dos solos

As medidas de granulometria foram realizadas com o analisador granulométrico automático (Figura 1) desenvolvido na Embrapa Instrumentação Agropecuária (Vaz et al. 1999; Naime et al. 2001), em triplicata, para cada amostra. As curvas de distribuição de tamanhos de partículas obtidas são apresentadas nas Figuras 2. Os dados apresentados são valores médios das 3 determinações para cada solo e juntamente com os pontos experimentais, são apresentados também ajustes realizados com uma função sigmoideal, através do software ORIGIN.



Figura 1. Analisador granulométrico de solos (Naime et al. 2001)

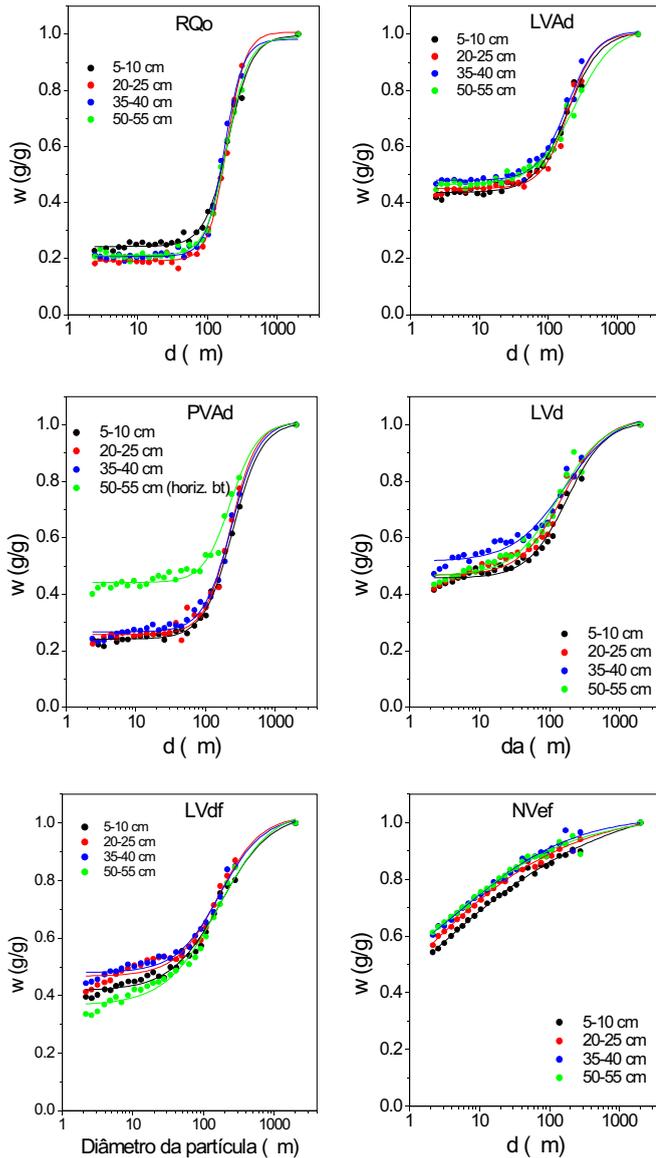


Figura 2. Curvas de distribuição dos tamanhos das partículas dos solos RQo, LVAd, PVAd, LVdf e NVeF (Tabela 1), nas profundidades de 0-5, 20-25, 35-40 e 50-55.

Curvas de retenção da água no solo

As análises das curvas de retenção da água no solo foram realizadas no laboratório de física do solo da ESALQ/USP e os resultados são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5. Os dados de retenção foram interpolados pela equação de Van Genuchten, dada a seguir:

$$s = r \frac{1}{1 + h^n} \quad (8)$$

onde  $r$  e  $s$  são as umidades na saturação e residual, respectivamente e  $n$  e  $m$  parâmetros de ajuste, os quais são obtidos neste trabalho, através do ajuste com a técnica de mínimos quadrados com a ferramenta Solver do Microsoft Excel. Os valores dos parâmetros de ajuste dos dados das curvas de retenção (Figuras 3, 4 e 5) para a equação de Van Genuchten são apresentadas na Tabela 2.

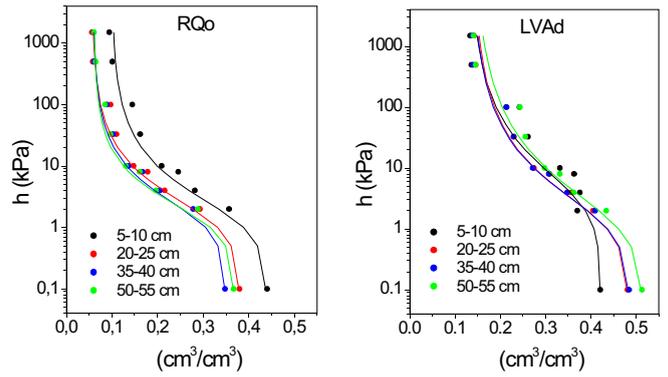


Figura 3. Curvas de retenção de amostras indeformadas, RQo e LVAd (Tabela 1), coletadas na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP, em diversas profundidades.

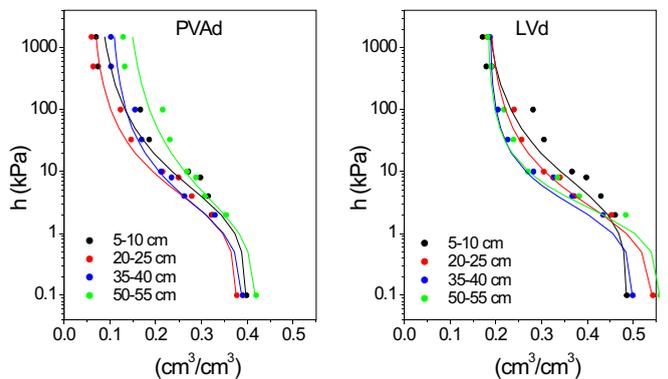


Figura 4. Curvas de retenção de amostras indeformadas, PVAd e LVd (Tabela 1), coletadas na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP, em diversas profundidades.

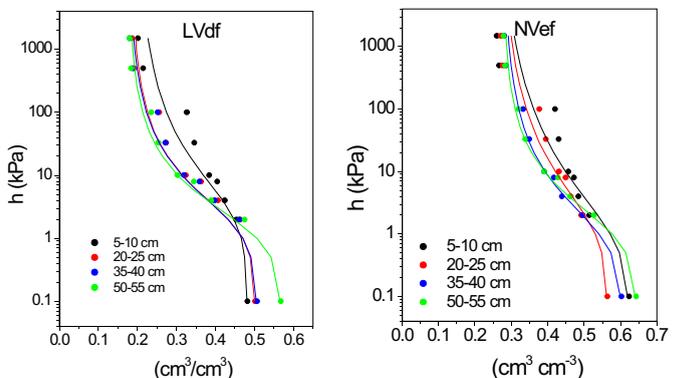


Figura 5. Curvas de retenção de amostras indeformadas, LVdf e NVeF (Tabela 1), coletadas na Embrapa Pecuária Sudeste, em São Carlos-SP, em diversas profundidades.

Aplicando-se o valor de  $m = 0,938$ , estabelecido pelo modelo de Arya e Paris observou-se um erro razoável na estimativa das curvas de retenção, o que pode ser verificado através de um gráfico comparando-se os valores de umidade estimados e medidos pelas curvas de retenção nos valores de potencial aplicados nas medidas de laboratório, com um  $r^2$  de 0,80 (Figura 6). Entretanto, para alguns solos, principalmente os mais argilosos, os valores estimados e medidos foram muito próximos sendo que para os mais arenosos o modelo apresentou os piores resultados.

Tabela 2. Parâmetros da equação de Van Genuchten obtidas com os dados das Figuras 3, 4 e 5.

Solo	N	r	s	EPE*	
RQo 0-5	0,5085	1,6380	0,0993	0,4388	0,00995
RQo 20-25	0,4837	1,6811	0,0562	0,3794	0,00137
RQo 35-40	0,4645	1,7328	0,0595	0,3481	0,00067
RQo 50-55	0,5081	1,8043	0,0607	0,3670	0,00066
LVd 0-5	0,1583	1,4781	0,1331	0,4203	0,00408
LVd 20-25	0,5520	1,4782	0,1414	0,4809	0,00132
LVd 35-40	0,5793	1,4720	0,1378	0,4838	0,00161
LVd 50-55	0,6607	1,4098	0,1409	0,5127	0,00316
PVAd 0-5	0,3075	1,4350	0,0692	0,3979	0,00422
PVAd 20-25	0,3502	1,5187	0,0596	0,3765	0,00105
PVAd 35-40	0,5820	1,5094	0,1016	0,3896	0,00088
PVAd 50-55	0,6526	1,3770	0,1284	0,4191	0,00233
LVd 0-5	0,2031	1,4645	0,1710	0,4860	0,00259
LVd 20-25	0,6804	1,5104	0,1813	0,5432	0,00091
LVd 35-40	0,4054	1,7593	0,1868	0,4986	0,00043
LVd 50-55	0,4525	1,7723	0,1828	0,5594	0,00158
LVdf 0-5	0,2257	1,3790	0,2007	0,4811	0,00416
LVdf 20-25	0,3544	1,5309	0,1858	0,5015	0,00123
LVdf 35-40	0,4048	1,5019	0,1789	0,5056	0,00130
LVdf 50-55	0,5923	1,5683	0,1787	0,5668	0,00097
NVef 0-5	1,0091	1,2774	0,2600	0,6232	0,01128
NVef 20-25	0,6116	1,3362	0,2709	0,5638	0,00416
NVef 35-40	0,9735	1,4560	0,2801	0,6027	0,00075
NVef 50-55	0,7496	1,5476	0,2776	0,6430	0,00056

\*EPE: erro padrão da estimativa (Spiegel, 1985)

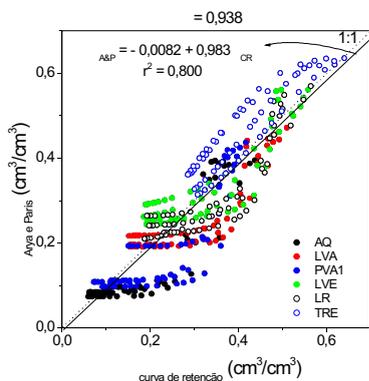


Figura 6. Umidade estimada através do modelo de Arya e Paris ( $\alpha = 0,938$ ), comparada com os valores medidos com a curva de retenção experimental. A linha pontilhada representa a reta 1:1 e a linha cheia representa a reta interpolada.

Desta forma procurou-se aplicar uma outra abordagem onde fosse considerado os diferentes tipos de solos, como por exemplo o proposto por Basile e D'Urso (1997) onde ao invés constante,  $\alpha$  fosse considerado como uma função do potencial da água ou umidade do solo. Neste caso, obteve-se os resultados apresentados na Figura 7.

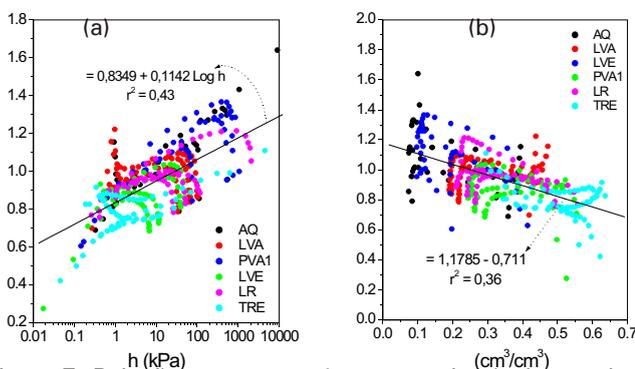


Figura 7. Relações entre o parâmetro  $\alpha$  e  $h$  (a), de acordo com Baile e D'Urso (1997) e  $\alpha$  e  $h$  (b).

Observa-se um ajuste melhor para a relação de  $\alpha$  com a tensão ( $r^2 = 0,43$ ) do que com a umidade ( $r^2 = 0,36$ ). Entretanto, do ponto de vista prático não é possível se utilizar a relação com a tensão, tal como apresentada por Basile e D'Urso (1997), uma vez que no modelo de Arya e Paris a tensão é calculada a partir do valor de  $\alpha$  (equações de 1, 3, 4 e 5). Assim, sugerimos a

determinação de  $\alpha$  em função da umidade (determinada pela equação 2) e utilização para a determinação de  $h$  pelas equações 1, 3, 4 e 5. As curvas de retenção estimadas pelo modelo de Arya e Paris, considerando este procedimento, são apresentadas para os solos RQo, LVdf, LVAd, LVd, PVAd e NVef, nas Figuras 8, 9, 10, 11, 12 e 13, respectivamente, para se verificar a melhora no ajuste, comparado com a utilização de um valor constante de  $\alpha = 0,938$  (Figuras 6).

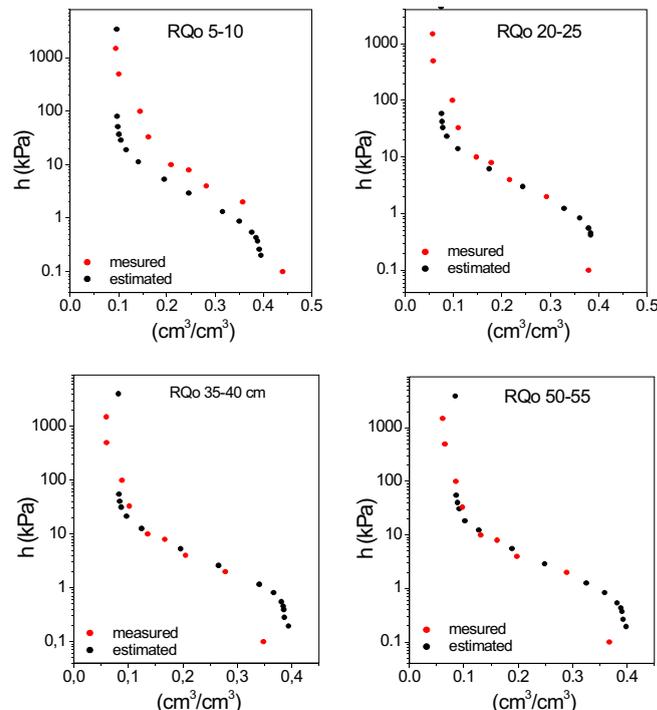


Figura 8. Curvas de retenção estimadas pelo método de Arya e Paris, considerando  $\alpha$  dependente de  $h$  (Fig. 7b) e medidas, para o solo RQo em diversas profundidades.

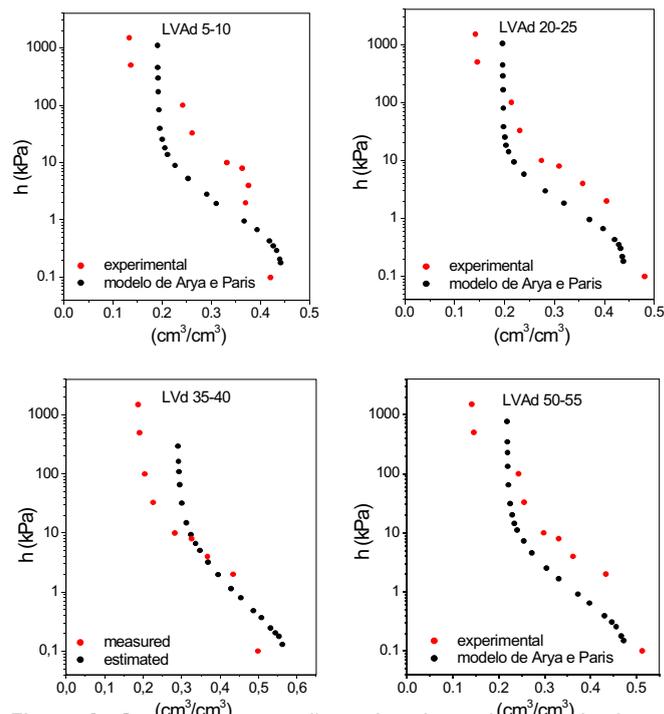


Figura 9. Curvas de retenção estimadas pelo método de Arya e Paris, considerando  $\alpha$  dependente de  $h$  (Fig. 7b) e medidas, para o solo LVAd em diversas profundidades.

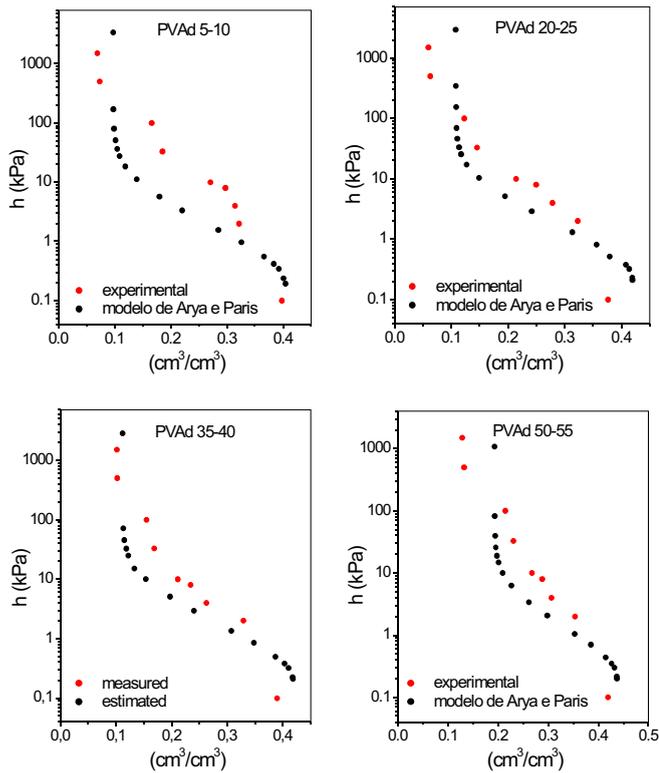


Figura 10. Curvas de retenção estimadas pelo método de Arya e Paris, considerando dependente de (Fig. 7b) e medidas, para o solo PVA em diversas profundidades.

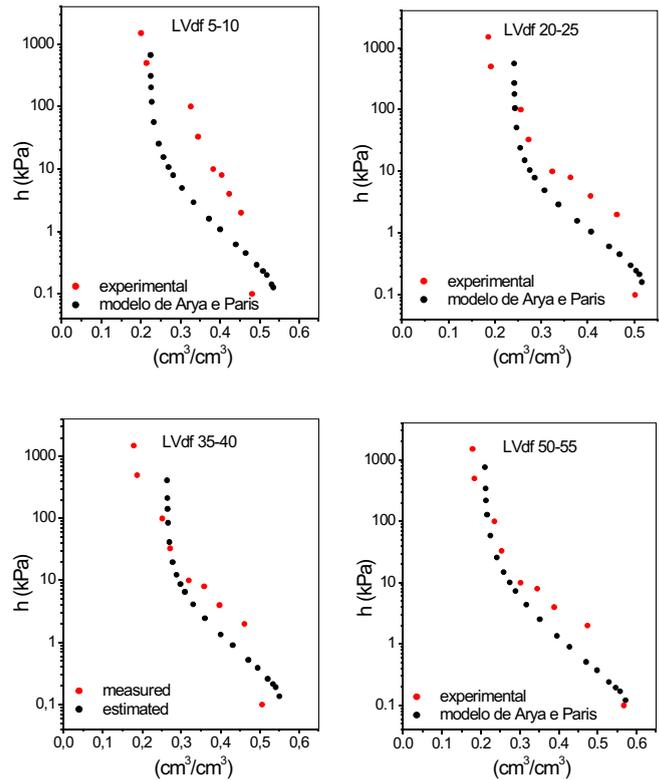


Figura 12. Curvas de retenção estimadas pelo método de Arya e Paris, considerando dependente de (Fig. 7b) e medidas, para o solo LVdf em diversas profundidades.

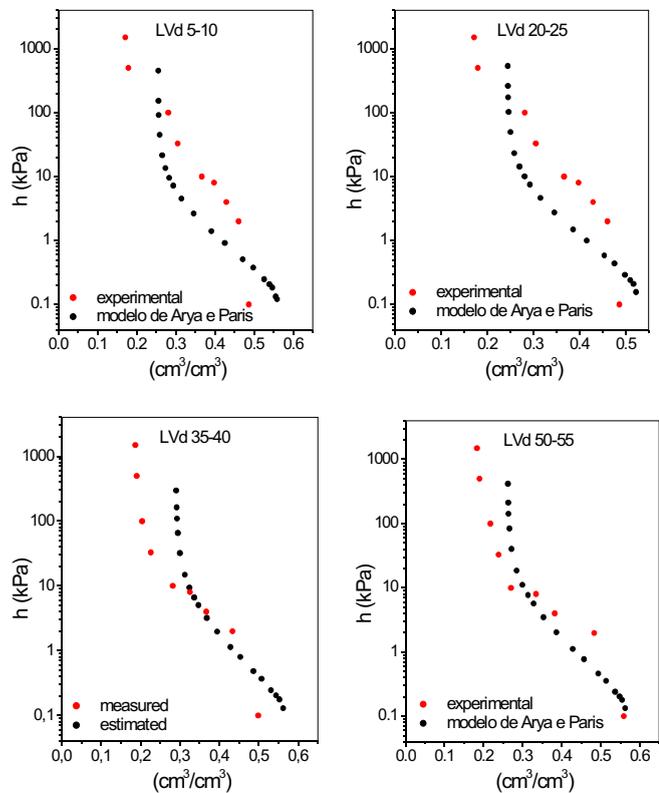


Figura 11. Curvas de retenção estimadas pelo método de Arya e Paris, considerando dependente de (Fig. 7b) e medidas, para o solo LVd em diversas profundidades.

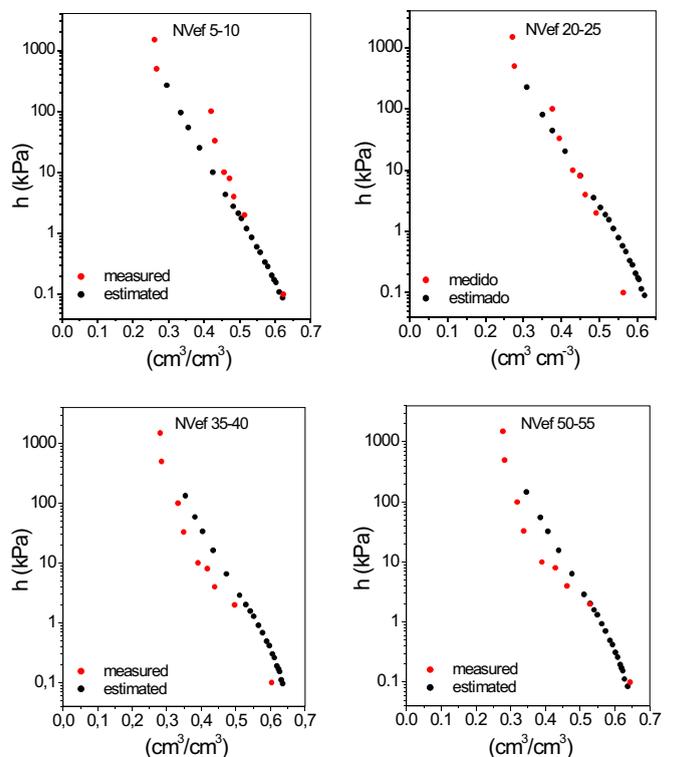


Figura 13. Curvas de retenção estimadas pelo método de Arya e Paris, considerando dependente de (Fig. 7b) e medidas, para o solo NVef em diversas profundidades.

Para verificar a precisão do ajuste do modelo com variável, para todos os solos em conjunto, é apresentado na Figura 14, uma comparação entre valores de umidade medidos e estimados do modelo de Arya e Paris.

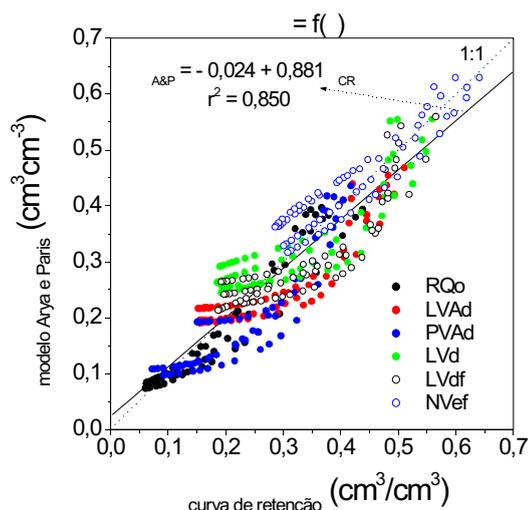


Figura 14. Umidade estimada através do modelo de Arya e Paris ( variável), comparada com os valores medidos com a curva de retenção experimental. A linha pontilhada representa a reta 1:1 e a linha cheia representa a reta interpolada.

Comparando-se os resultados apresentados na Figura 14 ( variável ) com os da Figura 6 ( =0,938), observa-se um aumento do coeficiente de determinação  $r^2$  e portanto da precisão na aplicação do modelo.

#### Conclusões

Os resultados apresentados mostraram que o Modelo de Arya e Paris permite a determinação da curva de retenção da água no solo, através de dados da curva de distribuição do tamanho das partículas, com precisão razoável. O procedimento proposto neste trabalho para a determinação da tensão da água (h) utilizando o parâmetro como função da umidade do solo, possibilitou uma aumento na precisão do modelo.

O analisador granulométrico desenvolvido na Embrapa Instrumentação Agropecuária, mostrou-se bastante adequado para a aplicação proposta (determinação indireta da curva de retenção da água no solo).

#### Referências Bibliográficas

- ARYA, L. M.; LEIJ, F.J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SHOUSE, P.J. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. **Soil Sci. Soc. Am. J.** Madison, v. 63, p.1063-1070, 1999.
- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981.
- ARYA, L. M.; DIEROLF, T. S. Predicting soil moisture characteristics from particle-size distribution: an improved method to calculate pore radii from particle radii: In: VAN GENUCHTEN, M. T.; LIJ, F. J.; LUND, L. J. INTERNATIONAL WORKSHOP ON INDIRECT METHODS FOR ESTIMATING THE HIDRAULIC PROPERTIES OF UNSATURATED SOILS. **Proceedings...**, Riverside, CA.: [s. n.], 1992. p. 115-125.
- BASILE, A.; D'URSO, G. Experimental corrections of simplified methods for predicting water retention curves in clay-loamy soils from particle-size determination. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 10, p. 261-272, 1997.
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPIS, 1997. p.27-36.
- NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 31, n. 3, p. 295-304, 2001.
- PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** Madison, v. 63, n. 6, p. 1748-1757, 1999.
- SPIEGEL, M. **Estatística**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1985. 454p.
- TOMAZELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** Madison, v. 64, p. 327-338, 2000.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 22, p. 573-581, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.
- VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n. 6, p. 403-410, 1999.

#### Comunicado Técnico, 57

Ministério da Agricultura,  
Pecuária e Abastecimento

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:  
**Embrapa Instrumentação Agropecuária**  
Rua XV de Novembro, 1542 - Caixa Postal 741  
CEP 13560-970 - São Carlos-SP  
**Fone:** 16 3374 2477  
**Fax:** 16 3372 5958  
**E-mail:** sac@cnpdia.embrapa.br  
www.cnpdia.embrapa.br

1a. edição  
1a. impressão 2003: tiragem 300

#### Comitê de Publicações

**Presidente:** Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso  
**Secretária Executiva:** Janis Aparecida Baldovinotti  
**Membros:** Dr. Odílio Benedito Garrido de Assis,  
Dr. João de Mendonça Naime,  
Dr. Rubens Bernardes Filho,  
Dr. Washington Luiz de Barros Melo  
**Membro Suplente:** Débora Marcondes B. P. Milori

#### Expediente

**Supervisor editorial:** Dr. Odílio B. Garrido de Assis  
**Revisão de texto:** Janis Aparecida Baldovinotti  
**Tratamento das ilustrações:** Valentim Monzane  
**Editoração eletrônica:** Valentim Monzane